

**Reflectometry arrangement has pinch plasma radiation source that emits polychromatic radiation divergent which is collimated and spectrally broken down**

Veröffentlichungsnr. (Sek.) DE19948264  
Veröffentlichungsdatum : 2001-11-08  
Erfinder : LEBERT RAINER (BE); ROSIER OLIVER (DE); BERGMANN KLAUS (DE);  
SCHRIEVER GUIDO (DE)  
Anmelder : FRAUNHOFER GES FORSCHUNG (DE)  
Veröffentlichungsnummer : ☐ DE19948264  
Aktenzeichen:  
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19991048264 19991006  
Prioritätsaktenzeichen:  
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19991048264 19991006  
Klassifikationssymbol (IPC) : G01N21/55; G01N23/20  
Klassifikationssymbol (EC) : G01N21/55, G01N21/33, G01N23/20  
Korrespondierende  
Patentschriften

---

**Bibliographische Daten**

---

A pinch plasma radiation source (1) emits a polychromatic radiation divergent which is collimated by a Bragg mirror (2) and an input slot (3) and spectrally broken down by a spectral taking apart grid (4). A multichannel detector (5) detects radiation reflected from the grid. An Independent claim is also included for a reflectometry method.

Daten aus der **esp@cenet** Datenbank - - I2





21 Aktenzeichen: 199 48 264.0  
22 Anmeldetag: 6. 10. 1999  
43 Offenlegungstag: 8. 11. 2001

71 Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung e.V., 80636 München, DE

72 Erfinder:

Lebert, Rainer, Dr., Kelmis, BE; Schriever, Guido,  
Dr., 52066 Aachen, DE; Bergmann, Klaus, Dr., 52134  
Herzogenrath, DE; Rosier, Oliver, 52428 Jülich, DE

56 Entgegenhaltungen:

DE 197 53 696 A1  
G.Schriever et al., J. Appl. Optics, Nr.7 (1998),  
S.1243-1248;  
D.H.Windt, K.K.Waskiewicz, Proc. Spie, 1547 (1997)  
S.144-158;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Anordnung und Verfahren zur Reflektometrie

57 Die Erfindung betrifft eine Anordnung sowie ein Ver-  
fahren zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und  
im weichen Röntgenwellenlängenbereich. Mit der Erfin-  
dung kann sowohl spektral aufgelöst wie auch wellenlän-  
genaufgelöste Reflektometrie betrieben werden. Die wel-  
lenlängenabhängige Reflektometrie wird durch eine An-  
ordnung durchgeführt, bei der ein Plasma polychromati-  
sche Strahlung divergent emittiert, bei der Mittel zur Kol-  
limation der Strahlung sowie Mittel zur spektralen Zerle-  
gung der reflektierten Strahlung und ein Mehrkanaldetek-  
tor zur Erfassung der reflektierten Strahlung vorgesehen  
sind, wobei als Strahlungsquelle ein Pinchplasma Einsatz  
findet. Die winkelaufgelöste Reflektometrie besteht in ei-  
ner Anordnung mit einem Plasma, welches polychroma-  
tische Strahlung divergent emittiert, mit einem Mono-  
chromator und mit einem Mehrkanaldetektor zur Erfas-  
sung der reflektierten Strahlung. Bevorzugtes Anwen-  
dungsgebiet ist die Charakterisierung von Multilayerspie-  
geln im EUV-Wellenlängenbereich sowie im Bereich der  
weichen Röntgenstrahlung, insbesondere solche für die  
EUV-Lithografie.

**[0001]** Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur spektral aufgelösten Reflektometrie nach dem Oberbegriff der Ansprüche 1, 5, 11 und 13. Die Erfindung dient dazu, um für den Spektralbereich der extremen Ultraviolettstrahlung oder der weichen Röntgenstrahlung bestimmte optische Elemente bzw. Komponenten optischer Elemente zu vermessen. Bevorzugtes Anwendungsgebiet ist die Vermessung von Optiken für Extrem-Ultraviolett-(EUV-)Strahlung, die aufgrund einer Beschichtung mit bis zu 100 Lagen von wenigen Nanometer Dicke aus abwechselnd verschiedenen Materialien (Vielschichtspiegel oder Multilayerspiegel aus Molybdän und Silicium oder Rhenium und Beryllium oder Y/Al und Mo/Be) in einem schmalen Spektralbereich hohe Reflektivitäten erreichen. Für derartige Systeme wird davon ausgegangen, dass sie in den nächsten Jahren im Bereich der EUV-Lithografie weitverbreitete Anwendung finden. Zur Überwachung des Herstellungsprozesses und zur Qualitätssicherung der optischen Systeme sind dann spektral- und/oder winkelauflösende Reflektometer im Spektralbereich der EUV-Strahlung dringend erforderlich.

## Stand der Technik

**[0002]** Es ist bekannt, dass die Reflektivität  $R(\lambda, \phi)$  von elektromagnetischer Strahlung sowohl von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängt, mit der eine Oberfläche beaufschlagt wird, als auch von deren Einfallswinkel  $\phi$  gegenüber der Oberflächennormalen. Die Reflektivität  $R(\lambda, \phi)$  eines optischen Elementes ergibt sich dabei aus der Intensität der reflektierten Strahlung geteilt durch die Intensität der einfallenden Strahlung. Bei spektraler Reflektometrie  $R(\lambda, \phi)$  wird bei konstantem Einfallswinkel  $\phi$  und variabler Wellenlänge  $\lambda$  gemessen und damit  $R(\lambda, \phi = \text{const})$  bestimmt. Bei der winkelabhängigen Reflektometrie wird  $R(\lambda = \text{const}, \phi)$  bestimmt, d. h. es wird bei konstanter Wellenlänge  $\lambda$  der Einfallswinkel  $\phi$  der Strahlung durchgestimmt.

**[0003]** Die Untersuchung der spektralen und/oder winkelabhängigen Reflexionseigenschaften von Vielschichtspiegelsystemen, sogenannten Multilayerspiegeln, im EUV-Bereich, d. h. im Wellenlängenbereich von ca. 10–20 nm, sowie im Bereich der weichen Röntgenstrahlung, d. h. im Wellenlängenbereich von ca. 1–10 nm, wird derzeit hauptsächlich an Strahlrohren an Elektronenspeicherringen bzw. Synchrotron-Strahlungsquellen durchgeführt. Ein Beispiel für eine derartige Synchrotron-Strahlungsquelle ist die Großforschungsanlage BESSY in Berlin. Ein Synchrotron ist für derartige reflektometrische Messungen gut geeignet, denn die Synchrotronstrahlung ist eine sehr brillante Strahlungsquelle die "weiße" EUV-Strahlung emittiert, d. h. die sehr breitbandig emittiert. Diese polychromatische Strahlung wird üblicherweise für ihren Einsatz zur Reflektometrie kollimiert, d. h. es wird ein gerichteter Strahl geschaffen, und anschließend monochromatisiert. Die derart präparierte Strahlung wird dann zur spektralen oder (einfalls-) winkelabhängigen Reflektometrie herangezogen, bei der ein einzelnes Detektorelement wie zum Beispiel eine Fotodiode die reflektierte Strahlung erfasst bzw. detektiert. Bei beiden genannten Varianten der Reflektometrie wird ein Parameter festgehalten und der andere Parameter durchgestimmt. Dabei werden die Intensitäten der reflektierten Strahlung seriell gemessen, d. h. die Messung besteht in einer zeitlichen Folge von Parameteränderung und Intensitätsmessung.

**[0004]** Auf eine Referenzmessung zur Bestimmung der Intensität der einfallenden Strahlung kann beim Synchrotron

oft verzichtet werden. Grund hierfür ist, dass die spektrale Verteilung der Synchrotronstrahlung nur von der Magnetfeldstärke des entsprechenden Ablenk magnets und der meist konstant gehaltenen Elektronenenergie abhängt, und dass die Brillanz der entstehenden Synchrotronstrahlung eine bekannte Funktion des im Synchrotron fließenden und permanent gemessenen Elektronenstroms ist.

**[0005]** Synchrotronstrahlungsquellen als Großforschungseinrichtungen weisen bei der EUV-Reflektometrie einige erhebliche Nachteile auf. Zum einen sind die Betriebskosten für Strahlrohre sehr hoch, und zum anderen stehen für derartige Messungen nur wenige Strahlrohre zur Verfügung. Damit kann bei einem industriellem Bedarf an derartigen Messungen zu Zwecken der Qualitätssicherung an optischen Elementen nicht sichergestellt werden, dass tatsächlich Mess- bzw. Strahlzeit an der primär für wissenschaftliche Zwecke konzipierten Großforschungsanlage zur Verfügung steht. Weiterhin kann nachteiligerweise die Vermessung der Proben nicht am Herstellungsort stattfinden, sondern es ist meist ein langer Anreiseweg nötig. Daher besteht ein erheblicher industrieller Bedarf an einer kompakten Strahlungsquelle im Labormaßstab, oder noch besser an einer portablen Strahlungsquelle, zu Zwecken der Reflektometrie im EUV- und Röntgenwellenlängenbereich.

**[0006]** In einem Fachartikel (D. H. Windt und K. K. Wasikiewicz, "Soft-x-ray reflectometry of multilayer coatings using a laser plasma source, Proc. SPIE, 1547, 144–158, 1997) wird ein Verfahren zur Reflektometrie im weichen Röntgenwellenlängenbereich sowie im EUV-Bereich offenbart, bei der ein lasererzeugtes Plasma als Strahlungsquelle eingesetzt wird. Dabei wird der Laserstrahl auf ein Target mit schweren Elementen fokussiert, so dass näherungsweise "weiße" EUV-Strahlung entsteht. Eine derartige Strahlungsquelle ist im Betrieb unproblematisch, verglichen mit dem Synchrotron sehr billig, und kann ganz entscheidend in einem individuellen Labor Einsatz finden. Mit dem in diesem Fachartikel offenbarten Messaufbau wird dabei Reflektometrie analog zum Synchrotron betrieben.

**[0007]** Allerdings sind mit der in diesem Fachartikel offenbarten Lösung auch beachtliche Nachteile verbunden. Zunächst emittiert die Plasmastrahlungsquelle im Vergleich zum Synchrotron mit erheblich geringerer spektraler Brillanz, so dass grundsätzliche längere Messzeiten in Kauf genommen werden müssen. Hinzu kommt, dass das Plasma nahezu isotrop emittiert was den Nachteil mit sich bringt, dass bei der Kollimation der Strahlung mittels des Eintrittspalts des Monochromators hohe Verluste auftreten. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Emission der Plasmastrahlungsquelle in Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung der laserlichtbeaufschlagten Stelle des Targets im allgemeinen von Puls zu Puls in der Intensität und in der spektralen Verteilung fluktuiert. Diese Fluktuationen treten meist unabhängig von den experimentellen Eingangsparametern auf. Daher ist es notwendig, parallel zur Vermessung der von der Probe reflektierten Strahlung eine Referenzmessung der die Probe beaufschlagenden Strahlung durchzuführen. Weiterhin kommt es bei laserinduzierten Plasmen nachteiligerweise zu Kontaminationen durch aufgeschmolzenes und/oder verdampftes Targetmaterial. Auch sind die Messzeiten unverhältnismäßig hoch.

**[0008]** In einem weiteren Fachartikel (G. Schriever et. al., J. Appl. Optics, Heft 37, Nr. 7, S. 1243 (1998)) wird eine Anordnung zur Bestimmung der Reflektionscharakteristik und des Reflektionskoeffizienten eines Multilayerspiegels im EUV-Wellenlängenbereich beschrieben, der ein laserproduziertes Goldplasma als Strahlungsquelle, einen Spektrographen sowie einen Mehrkanaldetektor zur Erfassung der reflektierten Strahlung umfasst. Der Spektrograph weist dabei

einen Eingangsspalt von 100 µm Breite auf durch welchen der reflektierte Strahl kollimiert wird. Mit dieser Anordnung entstehen jedoch nachteiligerweise Verunreinigungen durch aufgeschmolzenes und verdampftes Targetmaterial, welches sich unter anderem auch auf die zu vermessenden optischen Komponenten niederschlagen kann.

#### Darstellung der Erfindung

[0009] Der Erfindung liegt das technische Problem zugrunde, eine Vorrichtung und ein Verfahren für die Reflektometrie im weichen Röntgenwellenlängenbereich (d. h. Wellenlänge  $\lambda = 1-10$  nm) sowie im EUV-Bereich (d. h. Wellenlänge  $\lambda = 10-20$  nm) zur Verfügung zu stellen, die preiswert und mit möglichst geringem apparativen Aufwand möglichst kurze Messdauern ermöglichen. Vorrichtung und Verfahren sollen dabei sowohl spektrale als auch winkelabhängige Reflektometrie ortsauflöst und schnell erlauben. Hierbei sollen Verunreinigungen von aufgeschmolzenem und/oder verdampften Materialien vermieden werden.

[0010] Die Lösung dieses technischen Problems wird durch die in den unabhängigen Ansprüchen angegebenen Merkmale gelöst, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen durch die Unteransprüche angegeben sind.

[0011] In einer ersten vorteilhaften Variante der Erfindung ist ein Reflektometeraufbau vorgesehen, der als Strahlungsquelle eine Pinchplasmaquelle vorsieht, weiterhin Mittel zur Kollimation der Pinchplasmastrahlung. Mittel zur spektralen Zerlegung der Strahlung, sowie einen Mehrkanaldetektor zur Erfassung der reflektierten Strahlung.

[0012] Bei von der Anmelderin durchgeführten Experimenten hat sich ein Pinchplasma als ganz besonders geeignete Plasmastrahlungsquelle bewährt. Bei einem Pinchplasma (aus dem Englischen: to pinch: sich zusammenziehen) zieht sich das Plasma durch magnetische Kräfte zusammen und erwärmt sich gleichzeitig. Bei geeignet gewählter Elektrodengeometrie, Gasdruck und -art sowie Wahl der Strompulse kann ein derartiges Plasma bereitgestellt werden welches im gewünschten Wellenlängenbereich von  $\lambda = 1$  bis 20 nm emittiert, und zwar divergent und polychromatisch. Beispiele für derartige Pinchplasmen ist die Z-Pinch-Entladung oder die Plasmafokuserentladung. Eine besonders vorteilhafte Ausführung des Pinchplasmas ist das Kanalpinchplasma, bei dem das Plasma bedingt durch eine geeignete Elektrodengeometrie innerhalb eines Kanals zündet und sich anschließend innerhalb dieses Kanals zu einem Plasmakanal kleineren Durchmessers zusammenzieht. Eine hierzu geeignete Elektrodenkonfiguration ist die des Einkanalpseudofunkenschalters, wie zum Beispiel in der DE 197 53 696 A1 beschrieben. Ein Kanalpinchplasma ist deutlich preiswerter zu realisieren als ein lasererzeugtes Plasma, und ist diesem hinsichtlich der Betriebssicherheit und des Betriebsaufwandes vorzuziehen. Dies gilt insbesondere dann, wenn für den Anwendungsfall hohe Repetitionsraten gefordert werden. In diesem Fall nämlich läßt sich beim Kanalpinchplasma die Pulsfrequenz auf einfache Weise über den Leistungsregler des Hochstromkreises erhöhen, während beim laserinduzierten Plasma spezielle und sehr teure Laser erforderlich sind die die Kosten enorm in die Höhe treiben. Gegenüber dem herkömmlichen Pinchplasma ist das Kanalpinchplasma für die hier genannte Anmeldung sehr kompakt und weist weniger Fluktuationen als ein herkömmliches Pinchplasma auf. Je nach Anforderungen an die Genauigkeit der Messergebnisse können die geringeren Fluktuationen einen geringeren Aufwand bei den Referenzmessungen, also bei den Messungen der beaufschlagenden Strahlung, bedingen. Zusätzlich ist es einfacher als ein herkömmliches Pinchplasma zu betreiben.

[0013] Der Reflektometeraufbau enthält weiterhin Mittel zur spektralen Zerlegung der Strahlung um winkelabhängig messen zu können, d. h. um  $R(\lambda, \phi = \text{const})$  bestimmen zu können. Hierzu geeignet sind zum Beispiel Gitterspektrografen oder fokussierende Gitter, und bei letzteren insbesondere Toroidalgitter.

[0014] Die spektral zerlegte reflektierte Strahlung wird einem Mehrkanaldetektor zugeführt. Der Mehrkanaldetektor kann ein eindimensional auflösender Detektor sein wie zum Beispiel eine Zeile von Detektoren, ein sogenannter Zeilendetektor. Ein Beispiel hierfür sind CCD-Zeilendetektoren. Auch möglich ist ein zweidimensional ortsauflösender Detektor.

[0015] Dieser kann als zweidimensionales Array von Detektoren ausgeführt sein. Dabei hat das zweidimensionale Array von Detektoren den Vorteil, dass es als sogenannte CCD-Kamera kommerziell verfügbar ist, universell eingesetzt werden kann und auf ihm zusätzliche Informationen über die räumliche Verteilung der spektral reflektierten Strahlung erhalten werden kann. Zeilendetektoren sind für den EUV-Wellenlängenbereich weniger verfügbar, müssten als Sonderanfertigung an das Reflektometer angepasst werden. Ist der Zeilendetektor in x-Richtung ausgerichtet liefert er zudem nur ein bzgl. der y-Richtung integriertes Signal. Die nachfolgende rechnergestützte Auswertung würde sich jedoch im Falle eines Zeilendetektors vereinfachen. Besonders bevorzugt ist eine rückseitig gedünnte CCD-Kamera, die so ausgestaltet sind, dass sie besonders empfindlich im EUV-Wellenlängenbereich und besonders unempfindlich gegen Strahlenschäden sind. Dazu wird nicht wie bei herkömmlichen CCD-Kameras die Vorderseite bestrahlt wo sich eine die EUV-Strahlung teilweise absorbierende Isolatorschicht befindet, sondern die Rückseite der CCD-Kamera. Die Rückseite der CCD-Chips sind in einem speziellen Bearbeitungsschritt derart dünn ausgestaltet, dass EUV-Strahlung die empfindlichen Bereiche mit möglichst wenig Absorption erreichen.

[0016] Bei dieser Anordnung zur spektralen Reflektometrie im Sinne der vorliegenden Erfindung beaufschlagt die Pinchplasmastrahlungsquelle die zu untersuchende Probe mit kollimierter polychromatischer Strahlung, oder aber es wird die Strahlung nach der Reflexion kollimiert. Auf die Kollimation kann nicht verzichtet werden, da bei divergenter Beaufschlagung der Probe bei der spektralen Zerlegung eine Vermischung verschiedener spektraler Komponenten aufgrund der Faltung verschiedener Einfallswinkel und Beugungswinkel auftreten würde.

[0017] Eine Möglichkeit der Kollimation besteht darin, den Abstand zwischen Plasmastrahlungsquelle und Probe hinreichend groß zu wählen, also eine Abstandskollimation durchzuführen. Hierdurch wird jedoch nur die in einen kleinen Raumwinkel emittierte Strahlung für die Messung genutzt. Diese Art der Kollimation ist damit wenig effizient. Vorteilhafter ist daher die Verwendung einer Blende oder eines Blendensystems in der Nähe der Probe. Wird ein Gitterspektrograf eingesetzt, so besteht eine elegante Realisierung der Kollimation darin, den Eintrittsspalt des Spektrografen als Blende zu wählen. Am effizientesten, aber auch am aufwendigsten ist der Einsatz eines strahlformenden optischen Elements zur Kollimation, ein sogenanntes röntgenoptisches Element und/oder EUV-optisches Element. Hierbei steht besonders viel Ausgangsstrahlung für die Messung zur Verfügung. Das strahlformende optische Element muss dabei für den gesamten angestrebten Wellenlängenbereich, für den die Probe vermessen werden soll, zuverlässig funktionieren. Im EUV-Wellenlängenbereich kommen hierfür zum Beispiel Metalloberflächen in Betracht, die die Strahlung im streifenden Einfall reflektieren.

[0018] Es ist vorliegend auch möglich, dass mit dem Reflektometeraufbau orts aufgelöst gemessen wird. Hierzu wird so kollimiert, dass immer nur ein vorbestimmter Teil des zu vermessenden optischen Elements mit Strahlung beaufschlagt wird. Dieser Teil, nachfolgend Beleuchtungsfleck genannt, kann dann durch eine Relativbewegung von Kollimator und zu vermessendem optischen Element variiert werden.

[0019] In einer zweiten vorteilhaften Variante der Erfindung ist eine Anordnung zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und im weichen Röntgenwellenlängenbereich vorgesehen, bei der eine Plasmastrahlungsquelle polychromatische Strahlung divergent emittiert, und bei der ein Monochromator und ein Mehrkanaldetektor zur Erfassung der reflektierten Strahlung vorgesehen sind. Mit dieser Anordnung kann winkelabhängige Reflektometrie durchgeführt werden, d. h.  $R(\lambda = \text{const}, \phi)$  bestimmt werden.

[0020] Auch bei dieser Reflektometrianordnung wird ein ortsauflösender Detektor bzw. ein Mehrkanaldetektor eingesetzt. Dieser ermöglicht eine zeitlich gleichzeitige Detektion der verschiedenen Raumwinkelkomponenten der emittierten Plasmastrahlung und damit eine besonders schnelle Messung. Die Plasmastrahlung kann damit besonders effizient genutzt werden. Die besonders effiziente Nutzung der Strahlung drückt sich ferner im Verzicht auf einen Kollimator aus, durch den sonst die genutzten Raumwinkelbereiche der Strahlung eingeschränkt würden. Hinsichtlich der wählbaren Strahlungsquellen gilt hier das zur ersten Variante der Erfindung Gesagte, wobei hier zusätzlich ein laserinduziertes Plasma als Strahlungsquelle herangezogen werden kann. Hinsichtlich der nutzbaren Mehrkanaldetektoren gilt das oben Gesagte. Diese Variante zeichnet sich damit dadurch aus, dass die gegenüber der Oberflächennormalen unter verschiedenen Winkeln auftretenden Emissionskomponenten des Plasmas simultan erfasst werden.

[0021] Für die Bestimmung der Reflektivität ist neben der Intensitätsbestimmung der von der Probe reflektierten Strahlung eine Referenzmessung erforderlich, d. h. es muss die Intensität der beaufschlagenden Strahlung bestimmt werden. Für die Referenzmessung gibt es unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten.

[0022] Eine Möglichkeit besteht darin, dass für die Referenzmessung reflektierte Strahlung von einem Referenzspiegel herangezogen wird. Dabei ist es insbesondere für die orts aufgelöste Reflektometrie vorteilhaft, wenn der Referenzspiegel in der Nähe des Beleuchtungsflecks des zu vermessenden optischen Elements, zum Beispiel eines Spiegels, positioniert wird. Die Messstrahlung vom Beleuchtungsfleck auf dem Spiegel, als auch die vom Referenzspiegel reflektierte Strahlung, können dann zeitgleich von unterschiedlichen Bereichen des Mehrkanaldetektors erfasst und separat ausgewertet werden. Zur exakten Positionierung des Beleuchtungsflecks ist es dabei besonders vorteilhaft, wenn im Referenzspiegel eine Öffnung vorgesehen ist welche als Blende für die Messstrahlung dient. Bei der Zuhilfenahme eines derartigen Referenzspiegels kann zeitgleich mit nur einem Spektrografen die einfallende und die reflektierte Strahlung vom Mehrkanaldetektor gemessen werden. Die Justage kann so erfolgen, dass die Mitte des Detektors von der reflektierten Strahlung beaufschlagt wird, und dessen Rand vom Referenzsignal. Die zeitgleiche Messung von Messsignal und Referenzsignal hat dabei den Vorteil, dass die Messfehler bei der Bestimmung der Reflektivität geringer ausfallen.

[0023] Idealerweise wird für die Referenzmessung ein zweites, identisches Teilsystem aus Spektrograf und Detektor aufgebaut um die auf direktem Weg vom Plasma kommende Strahlung zu detektieren. Diese Vorgehensweise ist

jedoch sehr aufwendig. Alternativ wird nach Durchführung die Einheit bestehend aus Detektor und spektral zerlegendem Mittel derart neu positioniert, dass der Ausgangsstrahl direkt erfasst wird. Dies kann vereinfacht derart realisiert werden, dass sich diese Einheit auf einem Schwenkarm befindet, welche zur Referenzmessung um eine Achse gedreht wird.

[0024] Bei der Durchführung der Referenzmessungen hat es sich gezeigt, dass das Plasma meist bei weitgehend konstanter spektraler Verteilung mit fluktuierender Amplitude und somit mit fluktuierender Intensität emittiert. Bei geringerer Anforderung an die Messgenauigkeit genügt es deshalb, möglicherweise auf den Referenzstrahlengang zu verzichten und statt dessen eine einmalige Referenzmessung vorzunehmen. Um diesen Effekt zu berücksichtigen ist eine Kalibrierung erforderlich. Hierzu wird ohne ein Spektrograf im Strahlengang der Detektor mit der Ausgangsstrahlung des Plasmas beaufschlagt und die Intensität eines einzelnen Messkanals bzw. eines einzelnen Detektors als Referenz genommen und bei der eigentlichen Messung das reflektierte Spektrum mit dem Signal dieses einzelnen Detektors korrigiert.

[0025] Gegebenenfalls wird die spektrale Empfindlichkeit dieses einzelnen Detektors durch einen entsprechenden spektralen Filter eingengt. Dieser Filter verhindert, dass Fluktuationen in Spektralbereichen, die nicht zur Messung beitragen, das Messergebnis verfälschen.

[0026] Es kann jedoch auch vorkommen, dass das Plasma bereits mit vernachlässigbarer Amplitudenfluktuation emittiert. Für diesen Fall kann auf eine spezielle Referenz verzichtet werden und die Anzahl der Pulse der gepulst betriebenen Plasmaquelle zur Bestimmung der Intensität der einfallenden Strahlung herangezogen werden. Dies gilt insbesondere wenn ein Kanalpinchplasma eingesetzt wird. Bei diesen erfolgt die Wellenlängenkalibrierung mittels Plasmaemissionslinien von bekannten Elementen, die der Gasentladung zusätzlich zugeführt werden. So werden für den Betrieb des Reflektometers am Kanalpinch die Emissionslinien von Xenon verwendet. Zur Kalibrierung genügt es, anhand der Xenonlinien zu kalibrieren, oder statt Xenon Sauerstoff oder Stickstoff in die Plasmakammer einzuführen. Diese leichten Elemente emittieren wenige, aus der Literatur bekannte Emissionslinien mit Wellenlängen, die mit einer relativen Genauigkeit von unter 0,1% bekannt sind und so die Kalibrierung ermöglichen.

[0027] Ohne Einschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens soll die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Verfahren an einem Beispiel erläutert werden.

[0028] Fig. 1 zeigt zunächst für die Anordnung zur wellenlängenabhängigen Reflektometrie, wie orts aufgelöste Messungen an einem Braggspiegel (2) durchgeführt werden können. Die Plasmastrahlungsquelle (1), welche einen Durchmesser kleiner 1 mm aufweist, beaufschlagt aus einer Entfernung von ca. 75 cm und einem Divergenzwinkel von kleiner als 0,001 rad einen Braggspiegel (2) unter einem Einfallswinkel von 78°. Die reflektierte Strahlung wird einem Gitterspektrografen zugeführt welcher schematisch als zwei Komponenten im Strahlengang dargestellt wird. Die erste schematische Komponente ist der Eingangsspalt (3) des Spektrografen mit einer Breite von 100 µm, die zweite schematische Komponente das spektral zerlegende Gitter (4), welches als flat-field Gitter ausgeführt ist. Die spektral zerlegte Strahlung fällt dann auf einen Mehrkanaldetektor (5), der sich in einer Entfernung von ca. 75 cm vom Braggspiegel befindet. Der Mehrkanaldetektor ist als CCD-Chip ausgestaltet, der bei dieser Anordnung vertikal nach oben immer größere Wellenlängen  $\lambda$  detektiert. Der mit Strahlung

beaufschlagte Teil des CCD-Sensors bestimmt sich zum einen danach, welcher Anteil des Spiegels mit der jeweiligen Kollimation ausgewählt wird, vorliegend eine Fläche von  $860\ \mu\text{m}$  à  $360\ \mu\text{m}$ , zum anderen danach, wie der Eintrittsspalt des Spektrografen positioniert ist. Der strahlungsbeaufschlagte Teil des CCD-Sensors ist als mittiger schwarzer Balken auf dem CCD-Sensor zu erkennen und wies vertikal eine Breite von 30 Zeilen bzw.  $720\ \mu\text{m}$  auf. Durch eine Relativbewegung von Prüfobjekt und Kollimationsöffnung, d. h. durch Verschieben der Kollimationsöffnung oder durch eine Bewegung des Braggspiegels können andere Oberflächenbereiche mit Strahlung beaufschlagt und dadurch insgesamt eine orts aufgelöste Messung vorgenommen werden. [0029] Für die Bestimmung von Reflexionskoeffizienten eines Silicium-Molybdän-Mehrschichtspiegels wurde als Strahlungsquelle ein Kanalpinchplasma mit Xenon als Entladungsgas eingesetzt. Dieses emittierte breitbandig im Wellenlängenbereich von ca.  $10\ \text{nm}$  bis  $17\ \text{nm}$  bei einer Frequenz von ca.  $1\ \text{Hz}$ . Der Weg von der Strahlungsquelle zum Spiegel betrug ca.  $150\ \text{cm}$ . Der Messfleck auf dem Spiegel betrug ca.  $1\ \text{mm}$  à  $1\ \text{mm}$ . Die von der Probe reflektierte Strahlung wurde mit einem flat-field Spektrograf der spektralen Auflösung  $\lambda/\Delta\lambda = 200$  spektral zerlegt und dann von einem rückseitig gedünnten CCD-Detektor mit  $512$  à  $512$  Elementen detektiert. Spiegel, Spektrograf und Detektor waren in einer Vakuumkammer angeordnet. [0030] Für eine Messung wurde über 250 Pulse integriert, womit der statistische Fehler des Reflexionskoeffizienten ca.  $1\%$  war. Für ein qualitativ hochwertiges Messergebnis welches insbesondere beim industriellen Einsatz erforderlich ist, wird eine Genauigkeit von kleiner als  $0,3\%$  gefordert, was durch zeitgleiche Messung des Referenzsignals sowie durch eine Pulszahl von 1000 erzielen lässt. Dies würde bei Beibehaltung der Betriebsparameter zu einer Verlängerung der Messzeit von  $250\ \text{s}$  auf  $1000\ \text{s}$  führen. Über den Leistungsregler für den Hochstromkreis der Plasmastrahlungsquelle lässt sich jedoch auch eine höhere Repetitionsrate im Kilohertzbereich einstellen und damit die Messzeit auf deutlich unter  $1\ \text{s}$  reduzieren. Für eine ähnlich schnelle Messung mit einem laserinduzierten Plasma müsste ein deutlich höherer Aufwand bei ungleich höheren Kosten betrieben werden. [0031] Zur Aufnahme eines Referenzspektrums wurde der Spektrograf so in der Kammer aufgebaut so dass der durchgehende Strahl direkt erfasst wurde. Die Abstände und damit der erfasste Raumwinkel wurden dabei beibehalten und damit der vom Spektrografen genutzte Raumwinkel im Vergleich zur Messung mit Spiegel beibehalten. Für die Referenzmessung diente dabei ein mit der gleichen Zahl von Pulsen aufgenommenes Spektrum. Ein Messergebnis zeigt Fig. 2, bei der die Intensität  $I(\lambda)$  des Referenzspektrums sowie der reflektierten Strahlung in den Einheiten von Zählereignissen pro Detektorelement und Puls in x-Richtung abgetragen ist, und die Wellenlänge  $\lambda$  in y-Richtung. Der Spiegel reflektierte die Ausgangsstrahlung nicht im gesamten Spektralbereich, sondern nur in einem Bereich von ca.  $13\ \text{nm}$  bis  $15\ \text{nm}$ . Bei einer Wellenlänge von  $13,9\ \text{nm}$  wurde zum Beispiel eine Reflektivität von  $53\%$  gemessen.

#### Patentsprüche

1. Anordnung zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und im weichen Röntgenwellenlängenbereich, mit einem Plasma welches polychromatische Strahlung divergent emittiert, mit Mitteln zur Kollimation der Strahlung, mit Mitteln zur spektralen Zerlegung der reflektierten Strahlung, und mit einem Mehrkanaldetektor zur Erfassung der reflektierten Strahlung, dadurch

gekennzeichnet, dass als Strahlungsquelle ein Pinchplasma vorgesehen ist.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für die Kollimation eine Blende, ein Blendensystem, ein röntgenoptisches Element oder eine Abstandskollimation vorgesehen ist.

3. Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur spektralen Zerlegung ein Gitterspektrograf oder ein fokussierendes Gitter wie insbesondere ein Toroidalgitter vorgesehen ist.

4. Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass als Strahlungsquelle ein Kanalpinchplasma vorgesehen ist.

5. Anordnung zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und im weichen Röntgenwellenlängenbereich, mit einem Plasma welches polychromatische Strahlung divergent emittiert, mit einem Monochromator und mit einem Mehrkanaldetektor zur Erfassung der reflektierten Strahlung.

6. Anordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass als Strahlungsquelle ein Pinchplasma, ein Kanalpinchplasma oder ein laserinduziertes Plasma vorgesehen ist.

7. Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass als Detektor eine CCD-Kamera, insbesondere eine CCD-Kamera mit rückseitig gedünntem CCD-Chip vorgesehen ist.

8. Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass als Detektor ein Zeilendetektor vorgesehen ist.

9. Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass ein Referenzspiegel vorgesehen ist.

10. Anordnung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Referenzspiegel in der Nähe des Beleuchtungsflecks des zu prüfenden Objekts positioniert ist.

11. Verfahren zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und im weichen Röntgenwellenlängenbereich, insbesondere mittels einer Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem eine Referenzmessung zur Bestimmung der beaufschlagenden Strahlung vorgenommen wird, und bei dem die von einem Mehrkanaldetektor gemessene reflektierte Strahlung zuvor kollimiert und spektral zerlegt wird, dadurch gekennzeichnet, dass eine Pinchplasmastrahlungsquelle verwendet wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektometrie mit einem Kanalpinchplasma durchgeführt wird.

13. Verfahren zur Reflektometrie im extremen Ultraviolett- und im weichen Röntgenwellenlängenbereich mit einem polychromatische Strahlung divergent emittierenden Plasma, insbesondere mittels einer Anordnung nach mindestens einem der Ansprüche 5 bis 10, bei dem eine Referenzmessung zur Bestimmung der beaufschlagenden Strahlung vorgenommen wird, und bei dem die von einem Mehrkanaldetektor gemessene reflektierte Strahlung zuvor monochromatisiert wird.

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektometrie mit einem Pinchplasma, einem Kanalpinchplasma, oder einem laserinduzierten Plasma durchgeführt wird.

15. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Kollimation mit Hilfe einer Blende, eines Blendensystems, eines röntgenoptischen Elements oder durch Abstands-

kollimation durchgeführt wird.

16. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Reflektivität orts aufgelöst gemessen wird.

17. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 11 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass für die Referenzmessung reflektierte Strahlung von einem Referenzspiegel herangezogen wird. 5

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass die Referenzmessung mit dem Referenzspiegel zeitgleich mit der Messung der vom Prüfobjekt stammenden reflektierten Strahlung durchgeführt wird. 10

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

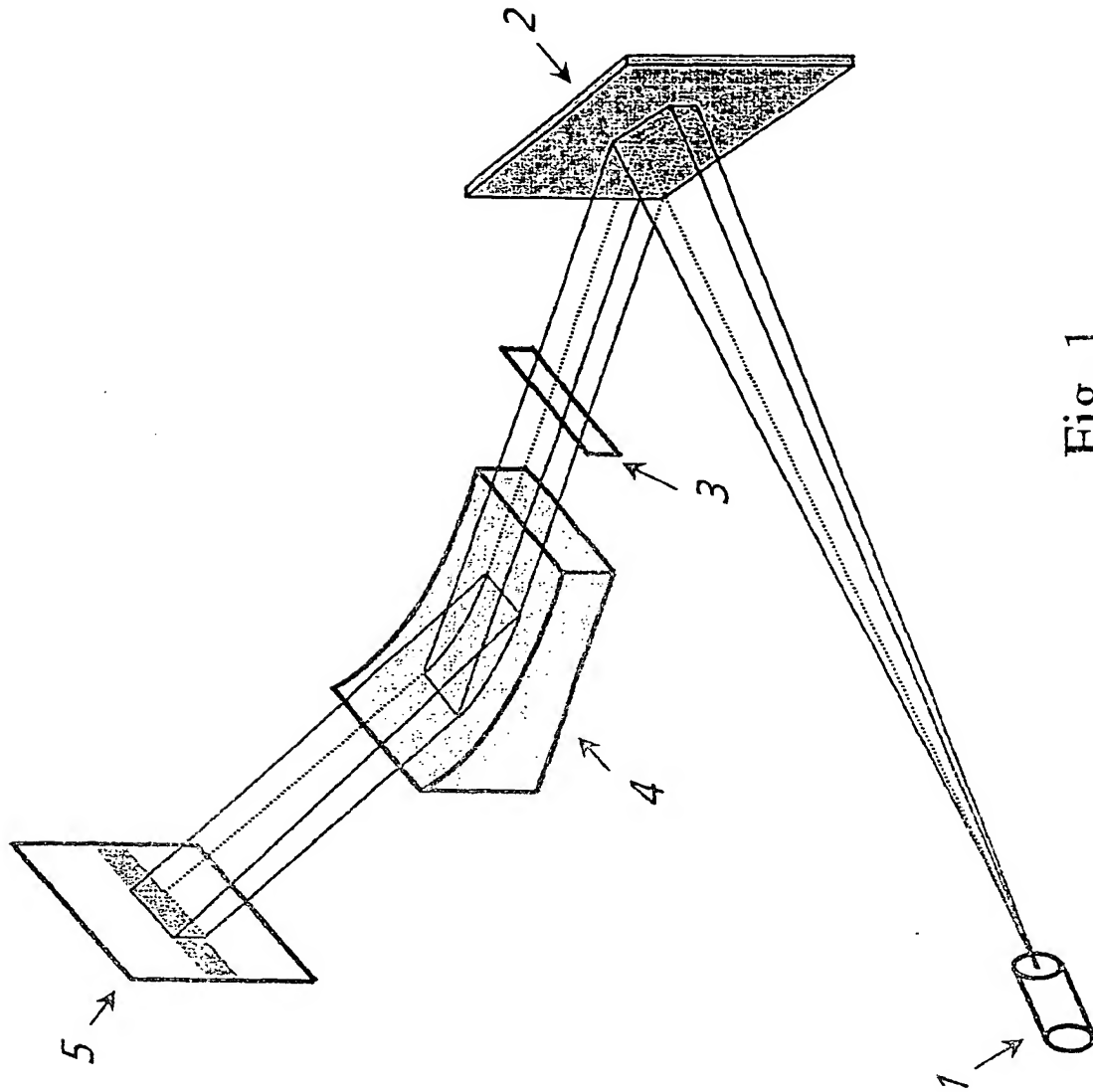


Fig. 1

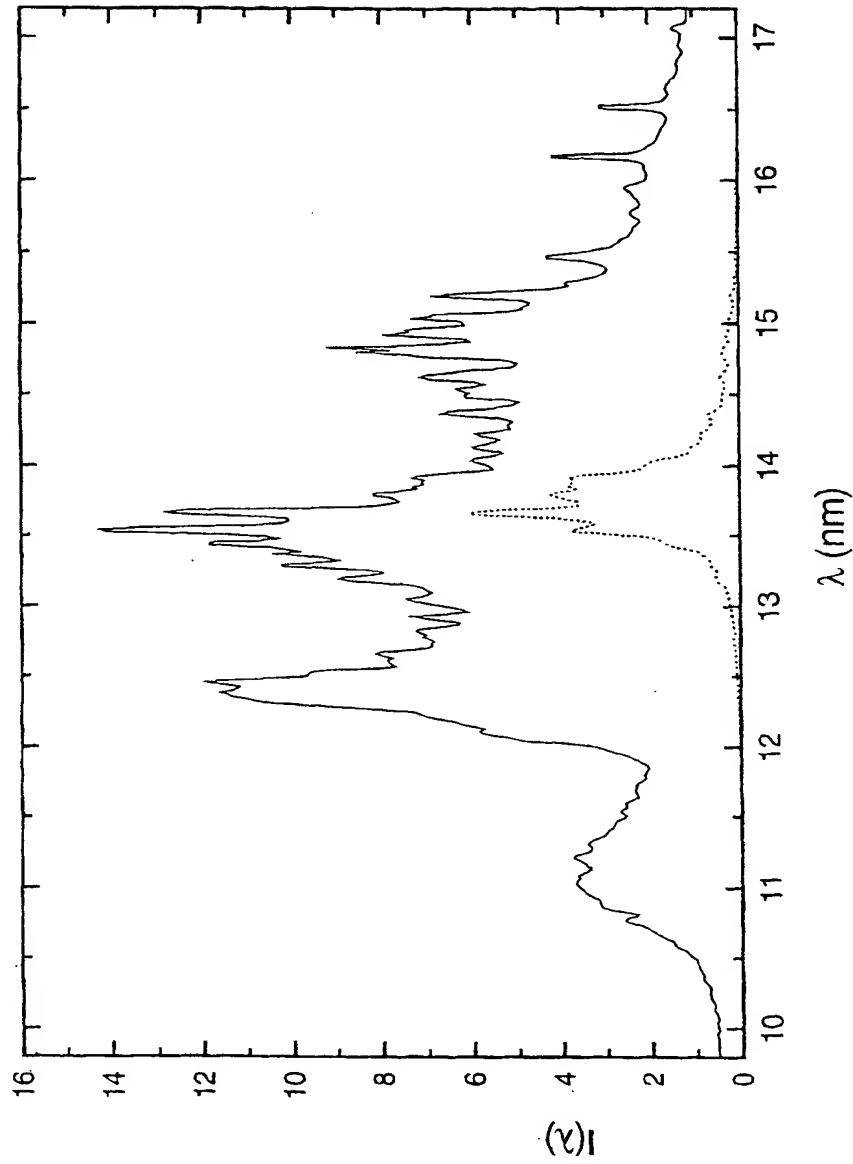


Fig. 2